

고조파 억압 이중모드 대역통과 여파기를 이용한 2.45 GHz 고효율 렉테나 설계

High Efficiency Rectenna for Wireless Power Transmission Using Harmonic Suppressed Dual-mode Band-pass Filter

홍 태 의* 전 봉 욱** 이 현 욱*** 윤 태 순**** 강 용 철***** 이 중 철*****
(Tae-Ui Hong) (Bong-Wook Jeon) (Hyun-Wook Lee) (Tae-Soon Yun) (Yong-Cheol Kang) (Jong-Chul Lee)

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 패치 안테나와 2차 및 3차 고조파가 억압된 이중모드 대역통과 여파기를 이용하여 고효율의 2.45 GHz 렉테나를 설계 및 제작하였다. 입사전력밀도가 0.3 mW/cm² 일 때 1.66 mW 의 전력을 수신하였고, 41.6% 의 RF-to-DC 변환효율의 실험 결과를 얻었다. 이는 입사 전력이 작기 때문에 다른 논문의 결과와 비교하여 고효율이라고 볼 수 있다. 또한 무선전력 전송을 통하여 다양한 응용기술 개발에 활용이 가능할 것으로 예측되며, USN(Ubiquitous Sensor Network)용 저전력 소자의 대기전원 공급 및 MEMS용 Sensor 등의 구동전압공급을 위한 무선 전력전송이 가능하게 될 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, a high efficiency 2.45 GHz rectenna with a microstrip patch antenna and a dual-mode band-pass filter in which the 2nd and 3rd harmonics are suppressed, is presented. From the experimental results, the 2.45GHz rectenna using 3rd harmonic suppressed dual-mode BPF shows the conversion efficiency of 41.6% with incident power density of 0.3 mW/cm² and the received power of 1.66 mW. This result shows high conversion efficiency because the received power of this rectenna is lower than other rectennas to be compared with. This rectenna can be applied to the WPT (Wireless Power Transmission) field for energy harvesting. Also, it is expected to be used to provide the stand-by power for the low power devices for USN, and wireless power transfer in sensor application of MEMS devices.

Key words: Wireless power transmission, rectenna, harmonic suppression filter, RF-to-DC converter, microstrip patch antenna

* 주저자 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

*** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

**** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 공학박사

***** 공저자 : KETI 융합센서소자연구센터 책임연구원

***** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 교수

† 논문접수일 : 2009년 11월 14일

† 논문심사일 : 2009년 12월 16일

† 게재확정일 : 2009년 12월 18일

I. 서론

최근 유비쿼터스 센서 네트워크 (USN, Ubiquitous Sensor network)을 기반으로 지능형 교통 시스템 (ITS)뿐만 아니라 물류, 의료, 항만, 재난 및 재해 등에 걸친 다양한 정보를 제공하는 응용 서비스들이 지속적으로 개발되고 있다. 이러한 USN 기술은 지속적인 전력 공급이 중요하며 인체 내부나 기계적으로 전원 연결이 어려운 장소에서도 전력을 공급할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행 되어 오고 있다.

따라서 본 논문에서는 유선 전력 공급이 어려운 환경에 있는 센서의 구동 또는 대기전력 공급을 목적으로 무선 전력 공급이 가능한 렉테나(Rectenna)를 설계 및 제작하고자 한다.

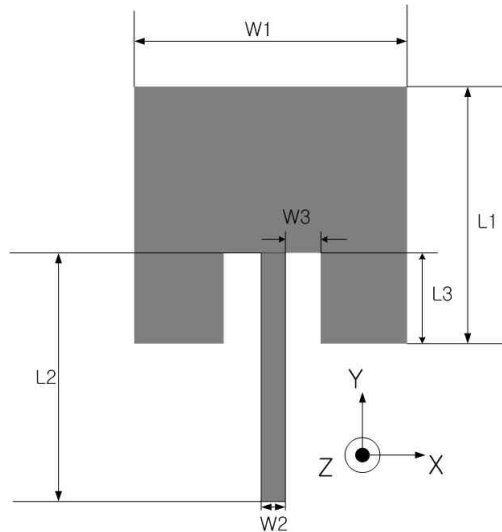
렉테나(Rectenna)는 정류회로(Rectifier)와 안테나(Antenna)의 합성어로서 1960년대 W. C. Brown박사가 만든 용어이다. 렉테나는 RF 신호를 받아들이는 안테나와 LPF(Low-pass Filter), 정류 다이오드, 부하 저항 등으로 구성되며 안테나에 입사된 RF 전력을 정류회로를 통해 DC 전력으로 변환해주는 소자를 말한다[1]. 렉테나는 RF-to-DC 변환효율(Conversion Efficiency)이 중요한 파라미터가 되고, 이는 안테나와 정류회로 사이에 정합 회로 또는 고조파 억압 여파기를 활용하여 증가시킬 수 있다 [2].

본 연구에서는 대기 중에서 손실이 적고, 분포소자를 이용한 소형 회로를 구성하기 쉬운 ISM 대역의 2.45 GHz 주파수를 선택하였고, 다이오드의 비선형성에 의하여 발생하는 고조파 신호가 안테나로 재방사되는 것을 방지하기 위하여 고조파 억압 여파기를 사용하였다.

II. 무선 전력 전송 시스템의 구현

1. 2.45 GHz 마이크로스트립 패치 안테나 설계

본 논문에서는 렉테나 설계에 있어 고조파 억압 여파기와 정류회로와의 연계성을 고려하고 비교적 간단하고 정확하게 만들 수 있는 마이크로스트립 패치안테나를 이용하였다[3].



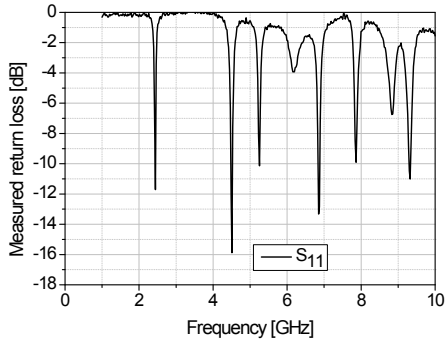
<그림 1> 2.45 GHz 마이크로스트립 패치 안테나
<Fig. 1> A microstrip patch antenna at 2.45 GHz

유전율과 유전체 손실 값을 각각 2.54와 0.002를 갖고 두께 0.54 mm인 Teflon 기판을 사용하여 중심 주파수 2.45 GHz에서 설계한 마이크로스트립 패치 안테나를 <그림 1>에 나타내었다. 길이 L2와 L3, 폭 W3의 크기 조절을 통해 안테나의 임피던스 매칭을 하였고 W2는 50Ω 선로의 선로 폭이다. 설계 파라미터를 <표 1>에 나타내었다.

안테나를 제작하여 측정된 반사손실의 결과를 <그림 2>에 나타내었다. 0.1 - 10 GHz 범위에서 측정하였으며, 패치안테나의 고차 모드에 의한 고조파 응답을 확인하였다. 고조파 억압 필터를 이용하여 이와 같은 고조파 성분을 제거함으로써 렉테나의 변

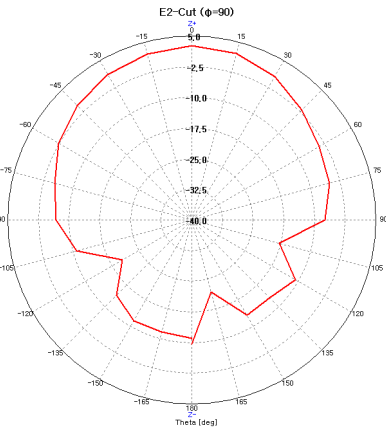
<표 1> 마이크로스트립 패치 안테나의 설계 변수
<Table 1> Parameters of the microstrip patch antenna

Parameters	Value [mm]
L1	39.5
L2	24.1
L3	9.26
W1	36
W2	1.49
W3	4.96



<그림 2> 측정된 마이크로스트립 패치 안테나의 반사손실

<Fig. 2> Measured return loss of microstrip patch antenna



<그림 3> 2.44 GHz 에서의 측정된 방사패턴 결과 (y-z plane, $\phi=90$)

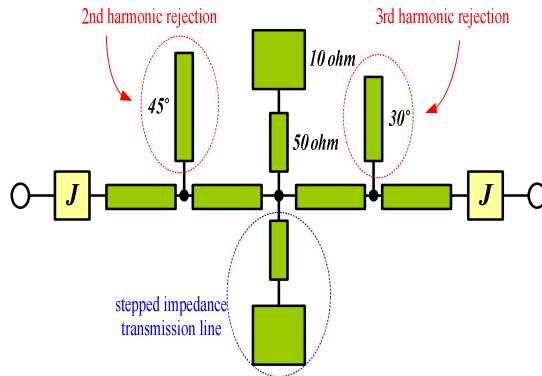
<Fig. 3> Measured radiation pattern at 2.44 GHz (y-z plane, $\phi=90$)

환효율을 증가시켜야 한다. 또한 <그림 2>는 제작한 안테나의 방사패턴의 측정 결과로써 2.44 GHz에서 최대 이득 3.09 dBi를 나타내었다.

2. 고조파 억압 이중모드 대역통과 여파기 설계

정류용 다이오드의 비선형성에 의하여 발생하는 고조파 신호전력이 다시 안테나를 통해서 재방사하는 것을 막기 위해 안테나와 다이오드 사이에 고조

파 억압 여파기를 삽입해야 한다. 그리고, 대역폭이 넓은 경우 고조파응답 또한 대역폭이 넓기 때문에 안테나로의 재 방사 확률이 높아진다. 따라서 여파기의 대역폭을 좁게 설계할 필요가 있다.



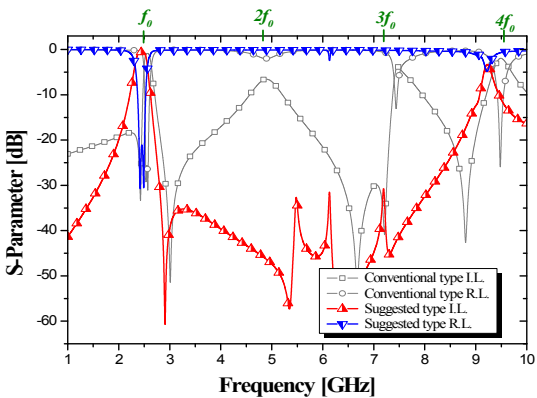
<그림 4> 고조파 억제용 대역 통과 여파기의 구조
<Fig. 4>. Structure of the harmonic rejected bandpass filter

<그림 4>에 본 논문에서 제안한 2.45GHz 대역의 고조파 억압 이중모드(Dual-mode) 대역 통과 여파기의 구조를 나타내었다. 듀얼 모드(dual-mode) 공진기는 <그림 4>와 같이 마이크로스트립 선로, 코플래너 웨이브가이드 구조 (coplanar waveguide : CPW) 등과 같은 기본적인 전송 선로의 반파장 공진기의 중간에 개방형 스텐브 (open-stub)를 연결하여 두 개의 공진 주파수를 발생시키는 것으로써, 동일한 면적으로 두 배의 공진 주파수를 만들어 크기를 줄일 수 있다는 장점을 갖고 있기 때문에 최근 활발한 연구가 진행되고 있다 [4-6]. 특히, 듀얼 모드 공진기는 공진기 중간에 연결된 개방형 스텐브로 인하여 발생된 2차적인 공진 주파수 근처에 전송선로 영점(transmission zero)을 갖게 됨으로 듀얼 모드 공진기를 이용하여 여파기를 제작을 하면 여파기의 기울기 특성 (skirt characteristics)을 크게 개선시켜 여파기의 대역폭을 좁게 할 수 있다.

본 논문에서 설계 및 제작한 이중 모드 고조파 억제 대역통과 여파기는 공진기 중간에 연결된 개방형 스텐브로 인하여 발생된 2차적인 공진 주파수 근처에 전송선로 영점(Transmission zero)을 갖게 됨을 이

용하여 여파기의 기울기 특성을 크게 개선시켰으며, 중심 주파수의 정수배로 나타나는 고조파를 억제하기 위하여 듀얼 모드 공진을 위한 개방형 스테브 외에 추가적인 개방형 스테브를 <그림 4>와 같이 양쪽에 형성 하였다. 추가적인 개방형 스테브는 전기적 길이를 45°와 30°로 하여 2차와 3차 고조파를 억제하도록 하였다.

<그림 5>는 고조파 억제 대역 통과 여파기를 Zeland사의 IE3D를 이용하여 2.45 GHz의 중심 주파수를 갖고 10%의 대역폭을 갖도록 설계한 고조파 억제 대역 통과 여파기의 설계 결과를 나타내고 있다. 본 논문에서 제안한 고조파 억제 대역 통과 여파기는 중심 주파수에서 0.58 dB의 삽입 손실을 갖고 21.06 dB의 반사 손실을 보였으며, 고조파 억제를 위한 개방형 스테브를 추가한 경우에 <그림 5>에서 나타낸 바와 같이 2차 및 3차 고조파까지 억압되어 8 GHz까지 30 dB 아래의 삽입 손실 값을 얻을 수 있었다.

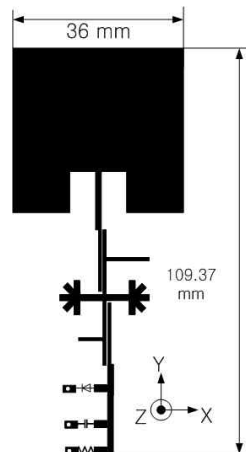


<그림 5> 고조파 억제 대역 통과 여파기의 설계 결과
<Fig. 5> Simulated results of the harmonic rejected band-pass filter

3. 듀얼모드 대역통과 여파기를 이용한 2.45-GHz 레테나

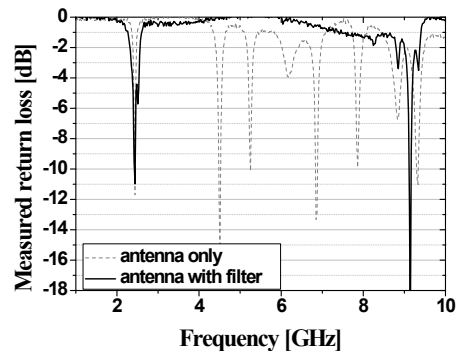
<그림 6>은 마이크로스트립 패치안테나에 3차 고조파 억압 듀얼모드 대역 통과 여파기를 연결한 뒤 정류회로를 연결한 2.45 GHz 레테나 구조이다. 우선 여파기와 결합된 안테나의 특성을 확인하기 위하여

정류회로를 연결하기 전에 반사손실과 방사패턴 및 안테나 이득을 측정 하였다. 먼저, <그림 7>은 여파기를 결합한 안테나의 반사손실 측정 결과를 나타낸다.



<그림 6> 이중모드 대역통과 여파기를 이용한 2.45-GHz 레테나 구조

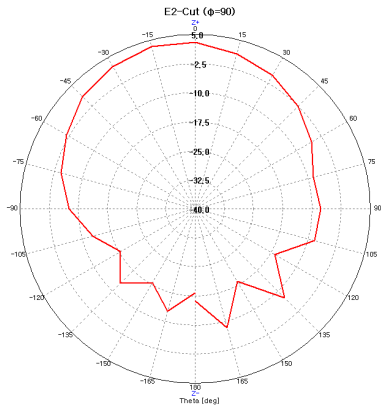
<Fig. 6> Configuration of the 2.45-GHz rectenna using a dual-mode band-pass



<그림 7> 여파기와 결합된 안테나 반사손실 측정 결과
<Fig. 7> Measured return loss of antenna with filter

점선으로 나타낸 결과는 <그림 2>와 동일한 것으로서, 여파기와 결합하기 전의 주파수 응답이고, 실선으로 나타낸 것이 안테나에 이중모드 여파기를 연결했을 때의 측정 결과이다. 두 가지 주파수 응답을 비교함으로써 2차 고조파(5.9GHz)와 3차 고조파

(7.35GHz)가 억압되었음을 확인할 수 있다. 또한 <그림 8>은 여파기와 결합된 안테나의 방사패턴 측정결과로써, 2.44 GHz 주파수에서 최대 이득 3.38 dBi를 갖는다.



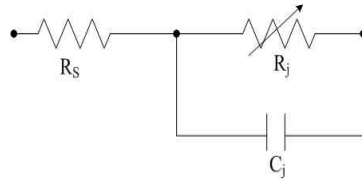
<그림 8> 여파기와 결합된 안테나의 방사패턴 측정 결과 (y-z plane, $\phi=90$)

<Fig. 8> Measured radiation pattern of antenna with filter at 2.44 GHz (y-z plane, $\phi=90$)

4. 정류회로의 설계

<그림 6>을 보면 알 수 있듯이 이중모드 여파기 다음에 이어지는 정류회로는 반파정류 회로로 구현하였다. 렉테나에서 정류용 다이오드는 안테나와 더불어 RF-to-DC 변환 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인이므로 다이오드 선택 시 사용 주파수는 물론 항복(breakdown)전압과 순방향(turn-on)전압을 고려해야 한다. 입력 전력에 따른 RF-to-dc 변환효율은, 순방향(turn-on) 전압이 작고 입력 전력의 크기에 비하여 항복(breakdown) 전압이 클수록 높아진다[7-8]. 따라서 본 논문에서는 6 GHz 대역까지 사용가능하고 Zero bias로 동작하며 순방향 전압 0.34V, 항복 전압 15V인 Agilent사의 Surface Mount Schottky diode HSMS-2820(single)을 사용하였다. 등가회로와 SPICE 파라미터를 <그림 7>에 나타내었다 [9]. 다이오드 다음에 이어지는 DC pass 여파기는 다이오드를 지나 부하저항으로 전달되는 RF 전력을 제거하기 위한

것으로 병렬 커패시터나 Radial Stub를 주로 사용하며, 여기서는 100 pF 칩 커패시터를 사용하였다.



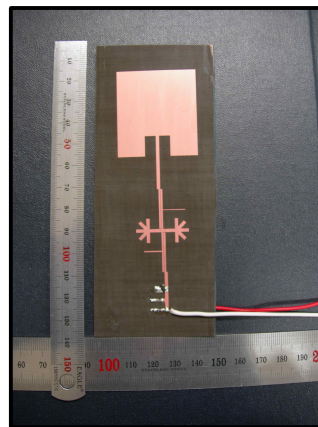
Parameter	Vbr	Cj0	Ibr	Is	Rs	PB
HSMS-2820	15V	0.7pF	1E-4A	2.2E-8A	6Ω	0.65V

<그림 7> HSMS-2820 다이오드의 등가회로와 SPICE 파라미터

<Fig. 7> Linear equivalent circuit model and SPICE parameter of a HSMS-2820 diode

III. 2.45GHz 렉테나 측정

렉테나 시스템은 유전율 2.54를 갖는 Teflon 기판에 제작되었으며, 제작된 2.45 GHz 렉테나는 <그림 8>에 나타내었다.



<그림 8> 제작된 렉테나의 구조 사진
<Fig. 8> Photography for the rectenna

우선, 렉테나가 수신하는 전력을 측정하기 위하여 자유공간 상에 <그림 9>와 같은 측정 시스템을 구성

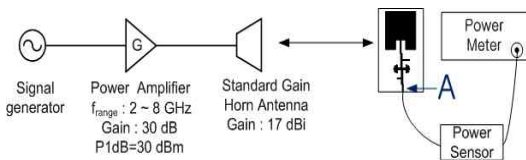
하였다. 전력 증폭기의 주파수 대역은 2-8 GHz, 30 dB 이득에 P1dB는 30 dBm이다. 송신용 인테나로는 2.5 GHz에서 이득이 17 dBi이고 안테나 직경이 27cm인 STANDARD GAIN HORN MODEL SGA-20을 사용하였다. 또한 렉테나가 수신한 전력을 파워센서(power sensor)가 감지하고, 파워 센서가 감지한 전력 레벨을 파워미터(power meter)로 읽어낼 수 있다. 케이블이 연결된 상태에서 파워센서의 calibration을 수행하였다.

Far-field 조건수식으로 계산한 거리(R), 115 cm 에서 측정된 렉테나의 수신전력 측정결과를 <표 2>에 나타내었다. 여기서 측정된 수신 전력은 송수신 안테나의 효율이 포함되어 있으며, 이는 곧 다이오드에 입력되는 전력으로 볼 수 있다. 송신안테나 입력 전력(Pt)과 측정된 안테나의 이득(Gr)을 식(1)에 대입하여 송신안테나가 방사하는 입사전력밀도(PD)를 계산하였다 [3].

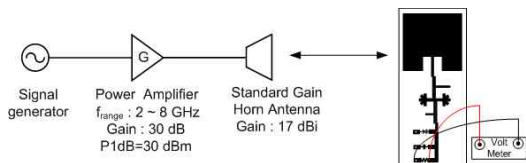
$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_A} \times 100 (\%) \tag{2}$$

<표 2> 2.45 GHz 렉테나 수신전력 측정결과
<Table 2> Received power of rectenna at 2.45 GHz

Pt [dBm]	Pr [dBm]	Pr [mW]	PD [mW/cm ²]
0	-24.61	0.003	0.0003
5	-19.81	0.01	0.0010
10	-14.72	0.034	0.0030
15	-9.72	0.107	0.0095
20	-4.88	0.325	0.0302
25	0.25	1.059	0.0954
30	2.2	1.66	0.3016



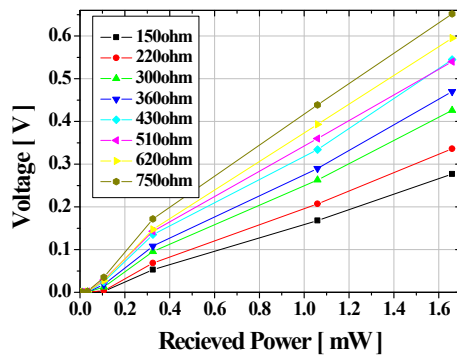
<그림 9> 렉테나 수신파워 측정 시스템
<Fig. 9> Received power measurement system



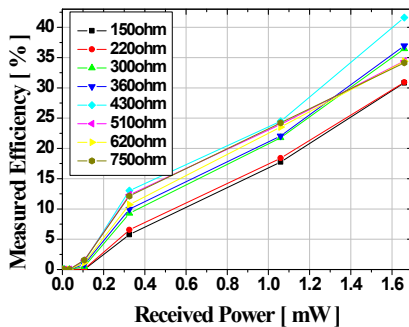
<그림 10> 렉테나 dc 전압 측정 시스템
<Fig. 10> dc voltage measurement system of 2.45GHz rectenna

$$P_D = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \tag{1}$$

<그림 9>에 표기된 'A' 지점에서 측정된 수신 전력을 PA라고 하면, 식(2)를 이용하여 RF-to-dc 변환 효율을 계산할 수 있다.



<그림 11> 부하저항(RL)에 따른 DC 전압 측정 결과
<Fig. 11> Measurement results of DC voltage with load resistance



<그림 12> 부하저항에 따른 변환효율 계산 결과
<Fig. 12> Calculated efficiency with load resistance

수신전력 측정 후, <그림 10>에서와 같은 측정시스템을 통하여 렉테나의 부하저항에 걸리는 dc 전압을 측정하였다. 부하저항을 바꿔가면서 측정한 V_{dc} 를 <그림 11>에 그래프로 나타내었다.

렉테나 수신 전력이 증가할수록, 그리고 부하저항이 클수록 V_{dc} 가 증가하는 것을 알 수 있다. 위 측정결과를 바탕으로 P_{DC} 를 계산하고, 최종적으로 변환효율을 계산하여 <그림 12>에 나타내었다.

변환효율 계산 결과, 수신 전력이 1.66 mW, 부하저항이 430 ohm 일 때, 41.6 %의 변환효율을 얻었고 이는 입사전력 밀도(PD)가 0.3 mW/cm² 일 때의 결과이다. 변환효율이 작게 나온 것은 렉테나 수신 전력이 작기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 참고문헌 [10]의 경우, 2.45 GHz에서 입사전력 밀도가 16 mW/cm²일 때의 변환효율이 78%이고, 참고문헌 [11]의 경우 2.45 GHz에서 70 mW/cm² 일 때 48%인 것을 감안하면 0.3 mW/cm²에서 41.6%는 합리적인 결과라 볼 수 있다. 렉테나의 결과를 비교하여 <표 3>에 나타내었다. 또한 <그림 11>의 변환효율 그래프의 기울기가 증가하는 추세인 것으로 미루어보아, 송수신 안테나의 이득을 증가시키거나 또는 송신안테나의 입력 전력을 높게 함으로써 수신 전력을 증가시킨다면 변환효율은 더 증가할 것으로 판단된다.

<표 3> 렉테나 실험 결과 비교

<Table 3> Comparison of rectenna experimental results

구 분	Ref.[12]	Ref.[10]	This work
주파수	2.45GHz	2.45GHz	2.45GHz
타입	ring slot	circular slot	Rec. patch
입사전력밀도	10 mW/cm ²	16.5 mW/cm ²	0.3 mW/cm ²
변환효율	65%	78%	41.6 %
사이즈	4*4.3 cm ²	6*6 cm ²	10.9*3.6 cm ²
출간년도	2007	2008	

IV. 결 론

본 논문에서는 이중모드 고조파 억제 대역통과 여파기를 이용하여 2.45 GHz의 소전력 무선 전력 전송 시스템을 설계하였다. 제작이 쉽고, 선형 이득이 좋은 마이크로스트립 패치 안테나를 선택하였고, 다이오드의 비선형성에 의하여 발생하는 고조파의 신호전력이 다시 안테나를 통해서 재방사하는 것을 막기 위해 9 GHz까지 고조파를 억제하는 이중모드 대역통과 여파기를 설계하여 정류회로를 구성하였다. 그 결과 입사전력이 0.3 mW/cm², 부하저항이 430 ohm 일 때, 41.6 %의 변환효율을 얻었다.

본 논문의 렉테나의 변환효율이 다른 결과에 비하여 작게 나온 이유는 렉테나로 입사되는 전력이 작기 때문인 것으로 볼 수 있다. 따라서 수신 안테나를 어레이(array)로 설계하여 안테나 이득을 높이거나 송신안테나에 입력되는 전력을 크게 하여 렉테나에 수신되는 전력, PA를 증가시킨다면 RF-to-DC 변환효율은 더 높아질 것이다.

본 논문에서 제안한 렉테나는 향후 에너지 고갈에 따른 대체 에너지 수집을 위한 우주 태양 전력전송과 마이크로파 무선 전력전송 등을 통한 다양한 응용기술개발에 활용이 가능할 것으로 예측되며, USN (Ubiquitous Sensor Network)용 저전력 소자의 대기전원 공급 및 MEMS용 Sensor 구동전압 공급을 위한 무선 전력전송이 가능하게 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sept. 1984.
- [2] 박종철, 이영철, "마이크로파 Rrectenna의 설계와 DC 변환 효율 분석에 관한 연구," *대한전자공학 회 논문지*, 제5권, 제2호, pp. 88-93, Feb. 1996.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna theory 3rd ed.*, John Wiley & Sons, Chap. 14, 2005.
- [4] J. R. Lee, J. H. Cho, and S. W. Yun, "New compact bandpass filter using microstrip $\lambda/4$

- resonators with open stub inverter,” *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 526-527, Dec. 2000.
- [5] L. Zhu and W. Menzel, “Compact microstrip bandpass filter with two transmission zeros using a stub-tapped half-wavelength line resonator,” *IEEE Microw. Wireless Comp. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 16-18, Jan. 2003.
- [6] W. H. Tu, “Compact double-mode cross-coupled microstrip bandpass filter with tunable transmission zeros,” *IEEE Microw. Antennas Propag.*, vol. 2, no. 4, pp. 373-377, 2008.
- [7] T. W. Yoo and K. Chang, “Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz Rectennas,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, June. 1992.
- [8] J. O. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, “Design and experiments of a high conversion efficiency 5.8-GHz rectenna,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2053-2060, Dec. 1998.
- [9] Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes HSMS-282x Series data sheet, *Agilent Technologies*.
- [10] T. C. Yo, C. M. Lee, C. M. Hsu, and C. H. Luo, “Compact circularly polarized rectenna with unbalanced circular slots,” *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 56, no. 3, pp. 882-886, Mar. 2008.
- [11] J. O. McSpadden and K. Chang, “A dual polarized circular patch rectifying antenna at 2.45 GHz for microwave power conversion and detection,” *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1749-1752, June. 1994.
- [12] Y. J. Ren, M. F. Farooqui, and K. Chang, “A compact dual-frequency rectifying antenna with high-orders harmonic-rejection,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 7, pp. 2111-2113, July. 2007.

저자소개



홍 태 의 (Hong, Tae-Ui)

1985년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월 : 인천대학교 전기공학과 (공학석사)
 1992년 2월~2004년 2월 : 전자부품연구원 책임연구원
 2004년 3월~2005년 6월 : 경운대학교 멀티미디어공학과 객원교수
 2004년 9월~현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정 수료
 2005년 7월~현재 : 요업기술원 책임연구원



전 봉 옥 (Jeon, Bong-Wook)

2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2008년 9월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정



이 현 옥 (Lee, Hyun-Wook)

2007년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2009년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2009년 2월~현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정
 2008년 3월~현재 : 전자부품연구원 위촉연구원



윤 태 순 (Yun, Tae-Soon)

2000년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2006년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2006년 9월~2007년 8월 : 광운대학교 전파공학과, PostDoc.
 2007년 10월~2008년 9월 : The SUNY at Buffalo, PostDoc.
 2008년 10월~현재 : 광운대학교 전파공학과, 연구교수.



강 용 철 (Kang, Yong-Cheol)

2007년 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1986년~1993년 : LG전자부품 전임연구원
 1994년~1994년 : 삼성전기 전임연구원
 1996년~현재 : 전자부품연구원 책임연구원



이 중 철 (Lee, Jong-Chul)

1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
 1989년 12월 : Arizona State Univ. EE Dept. (공학석사)
 1994년 5월 : Texas A&M Univ. EE DEPT. (공학박사)
 1994년 6월~1996년 2월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원
 1996년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 교수